

REPUBLIQUE DU SENEGAL

Un Peuple – Un But – Une Foi

Université Cheikh Anta DIOP de Dakar

École Supérieure Polytechnique



Centre International de Formation et de Recherche en Énergie Solaire

Convention relative aux subventions locales

N° de la convention : 83357007

Contribution à la création d'un écosystème favorable au développement d'activités productives s'appuyant sur la formation, la recherche et le soutien technique des différents acteurs

N° Projet :15.2217.6-001.00

Rapport Final sujet 1

Octobre 2021

SUJETS DE RECHERCHE 1

DÉTERMINATION DES PROFILS D'UTILISATIONS DES PLATEFORMES MULTIFONCTIONNELS ET LEUR INFLUENCE SUR LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE : ANALYSE DES DONNÉES : SITE DE GODAGUENE SOROKH

Travail réalisé par Dr Mohamed Cherif AIDARA sous la supervision de :

Mamadou Lamine NDIAYE, Mouhamadou Falilou NDIAYE et Vincent SAMBOU

GIZ-PED

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
PED
Programmes-Energies-Durables

Table des matières

Introduction générale.....	3
1. Présentation du sujet	4
2. Démarche méthodologique.....	5
2.1. Site d'étude et donné technique	5
2.2. Plateforme de monitoring Victron du site de Godaguene	6
2.2.1. Tableau de bord de la plateforme VRM Victron.....	7
2.2.2. Données de monitoring de la plateforme du site de Godaguene.....	7
2.3. Méthode de traitement des données monitoring	8
2.3.1. Détermination de la journée type	8
2.3.2. Détermination de l'énergie non utilisée	9
3. Résultats obtenus.....	10
3.1. Visualisation de la consommation des équipements	10
3.2. Energie non utilisée.....	12
4. Recommandation.....	15
Conclusion générale	16

Introduction générale

L'accès limité aux services énergétiques dans les villages ruraux d'Afrique de l'Ouest induit une vulnérabilité spécifique des ménages. Même si cette problématique est au cœur de politiques régionales et nationales, sa prise en compte dans des politiques de développement qui visent le capital humain reste encore défailante. Dès lors, l'implantation de petites structures villageoises de services énergétiques pourrait être le moyen de réconcilier le développement matériel et technique avec le développement humain. D'où la mise en place de plateforme multifonctionnelle (PTFM).

Une PTFM est un ensemble d'équipements qui fournit des services énergétiques.

Depuis une vingtaine d'années, plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest ont mis en place des programmes PTFM sur leur territoire. Au Sénégal, c'est en 2002 que les premières plateformes multifonctionnelles sont installées.

À partir de 2008, l'objectif est de faire du programme PTFM un programme national, la couverture géographique est élargie et le nombre de PTFM à installer s'accroît. De nouveaux partenaires financiers et techniques sont par ailleurs actifs.

Dans le cadre de la collaboration entre le Centre International de Formation et de Recherche en Énergie Solaire et la GIZ, autour du thème « Contribution à la création d'un écosystème favorable au développement d'activités productives s'appuyant sur la formation, la recherche et le soutien technique des différents acteurs » plusieurs études sont menées par des chercheurs de l'ESP. C'est dans ce contexte que cette étude sur la caractérisation des profils d'utilisation d'une plateforme multifonctionnelle nous a été faite.

L'étude est principalement orientée vers la détermination du meilleur protocole d'usage afin d'optimiser les performances énergétiques du PTFM.

Pour ce faire, ce travail tente d'abord de répondre aux questions suivantes:

Quel est le profil d'utilisation de la plateforme de ce village ?

Quel est l'énergie non utilisée au niveau du système solaire de ce village ?

Comment valoriser l'énergie restante non utilisée ?

1. Présentation du sujet

Le programme de plateformes multifonctionnelles (PTFM) vise à favoriser l'accès à l'énergie dans les villages ruraux sénégalais. En proposant notamment des services de mouture et de broyage, le programme s'adresse d'abord aux femmes.

Ils permettent d'alléger le travail domestique des femmes, de gagner du temps, de développer des activités génératrices de revenus et de contribuer au développement du milieu rural.

Toutefois, la manière d'utiliser la plateforme multifonctionnelle n'est pas optimisée ce qui engendre une quantité importante d'énergie non utilisée. Cela influe alors sur le dimensionnement des installations et par la suite sur le coût d'investissement initial, les coûts de renouvellement et de maintenance. Au-delà, de l'aspect excès de production, la problématique de la valorisation de l'énergie non utilisée s'avère intéressante.

Il est alors important de caractériser les modes d'utilisation des équipements dans le milieu productif d'une part afin d'optimiser l'utilisation et d'autre part de déterminer le meilleur protocole d'usage pour un besoin exprimé.

C'est ainsi que des données de monitoring de la plateforme fonctionnelle située dans le village de Godaguene Sorokh ont été mises à notre disposition afin de nous fournir des informations sur l'utilisation de la plateforme, le comportement des usagers, les types d'activités et la hiérarchisation des tâches.

Objectifs du travail

Les objectifs de ce travail sont quadruples :

- Caractériser les modes d'utilisation des équipements
- Déterminer le rendement et l'énergie non utilisée de l'installation.
- Définir et valider des stratégies de gestion des plateformes multifonctionnelles
- Déterminer des kits standards en fonction des besoins, de la zone géographique et du coût d'investissement initial

2. Démarche méthodologique

2.1. Site d'étude et donné technique

Le village de Godaguene Sorokh est localisé dans la communauté rurale de Niakhar dans le département de Fatick. Ces coordonnées géographiques sont 14°29' latitude nord, 16° 24' longitude ouest.

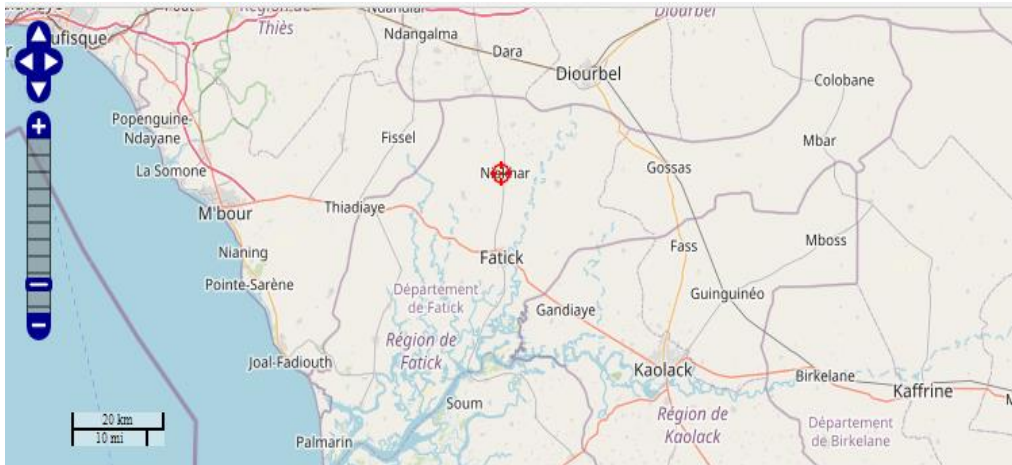


Figure 1 : Géolocalisation de Niakhar (Godaguene)

Le système solaire installé à Godaguene a une capacité de 20 kWc et est constitué d'un système de production d'énergie et de plusieurs équipements productifs :

Tableau 1 : Système de production d'énergie

Nombre	Composants
54	Modules PV 375 Wc
1	Onduleur réseau 20 kW
48	Batteries OPZS 1220 (Ah)
3	Convertisseur chargeur Victron 8kVA
2	Variateurs 5,5 kW pour le moulin et la décortiqueuse

Tableau 2: Equipements productifs

Nombre	Charges
01	Moulin à mil 3,300 kW
01	Décortiqueuse 3,730 kW
01	Vibro tamiseur 523 W
01	Congélateur 150 W

Les principaux équipements utilisés dans ce site et leur mode d'utilisation sont :

- Le congélateur d'une puissance de 150 W environ en mode fonctionnement continu 24h/24.
- Le moulin et la décortiqueuse qui sont fonction de la demande de 7h à 9h le matin et l'après-midi de 18h à 20h. Pour des cas exceptionnels (cérémonie familiale...) dans le village, la décortiqueuse et le moulin peuvent fonctionner pendant d'autres intervalles de temps.
- La recharge des batteries de portable (continue) peut occasionner une consommation comprise entre 50 et 60 W.

Il faut noter que dans ce site, depuis la mise en service du système, le Vibro tamiseur n'a jamais fonction dû au fait qu'il ne répond à aucun besoin des habitants de ce village.

2.2. Plateforme de monitoring Victron du site de Godaguene

La plateforme Victron est organisée avec deux pages principales d'informations :

- Dashboard : vision synthétique et synoptique des données
- Advanced : ensemble des courbes disponibles sous la forme de widgets

2.2.1. Tableau de bord de la plateforme VRM Victron

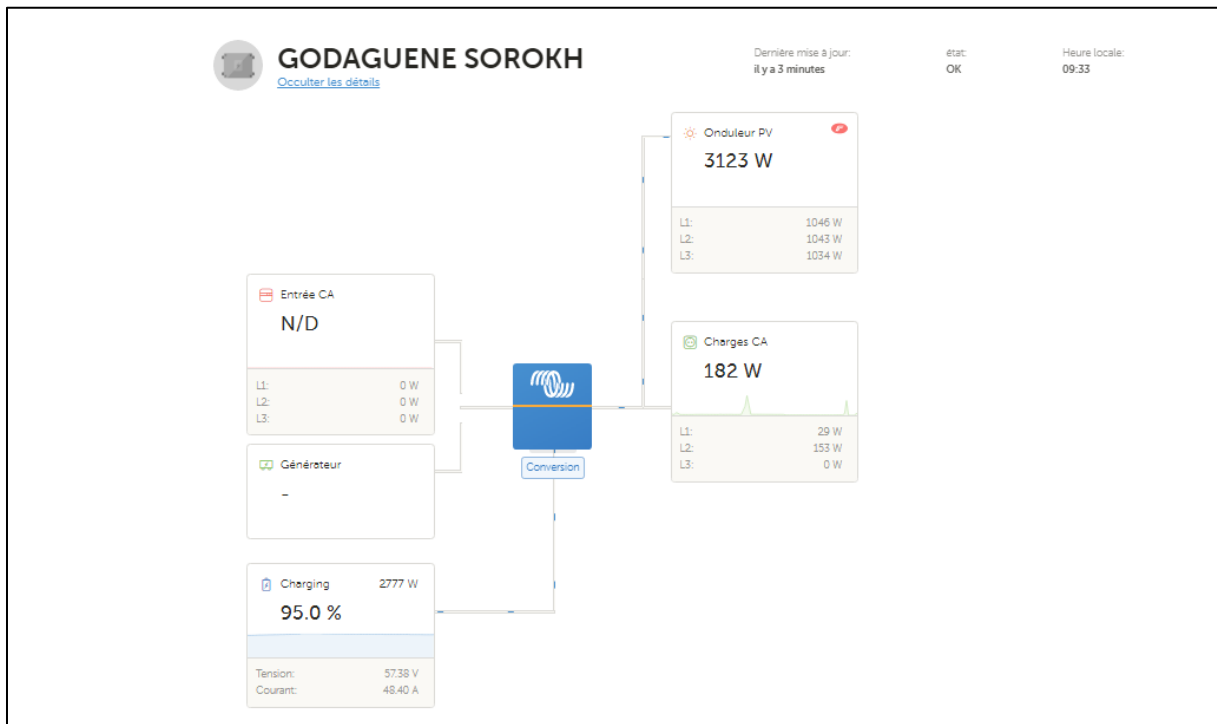


Figure 2 : Tableau de bord de la plateforme du site de Godaguene

2.2.2. Données de monitoring de la plateforme du site de Godaguene

Pour cette étude, un ensemble de donnée a été mise à notre disposition (données puissance et données énergie) sur une période de mesure allant du **02-05-2021 au 30-06-2021** par pas de 15 mn. Sur ces données, les informations utiles pour mener à bien cette étude sont présentées en dessous. Ces données peuvent être téléchargées au niveau de la plateforme dans la partie « Advanced » en cliquant sur le bouton Download.

Informations disponibles

- Timestamp
- Puissance AC en sortie de l'onduleur
- Puissance AC consommée par chaque appareil
- Info sur l'état de la batterie (tension, niveau de charge ...)
- PV to batterie-kWh : Energie venant des panneaux solaires et allant dans les batteries
- PV to consumers-kWh: Energie venant des panneaux solaires et allant vers les consommateurs.
- Battery to consumers-kWh : Energie venant des batteries et allant vers les consommateurs.

2.3. Méthode de traitement des données monitoring

Les tableaux Excel (Puissance et Energie) sont traités afin de caractériser le mode d'utilisation de la plateforme fonctionnelle. Les données sont disponibles par pas de 15 mn il est de ce fait nécessaire de calculer les valeurs horaires et les valeurs journalières sur toute la période d'étude. Par la suite, nous allons travailler avec une journée type représentative de toutes les journées de la période d'étude. La méthode de détermination de la journée type est présentée dans la section suivante.

2.3.1. Détermination de la journée type

La journée type sur la période d'étude est définie comme étant la journée la plus proche de la moyenne des mesures. Elle représente de ce fait l'ensemble des journées sur la période considérée.

Toutes les heures, la moyenne de la variable est calculée.

La valeur moyenne sur la période des données \bar{V}_h à l'instant h est donnée par l'équation 1. La journée moyenne est définie par l'équation 2.

$$\bar{V}_h = \sum_{j=1}^{j=N} \frac{V_{j,h}}{N} \quad (1)$$

$$\bar{V}_m = [\bar{V}_{00h}, \bar{V}_{01h}, \dots, \bar{V}_{23h}] \quad (2)$$

Où N est le nombre de jour sur la période

h l'instant correspondant à la mesure pour le jour j ; h [0h, 01h, 02h.....23h]

j le numéro du jour ; j [1, 2, 3,.....N]

La journée type J est choisie comme étant la plus proche de la journée moyenne \bar{V}_m .

Le calcul de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) nous permet de déterminer la journée type pour chaque mois en considérant la journée ayant enregistré l'erreur la plus petite. En effet, l'erreur quadratique moyenne mesure l'ampleur de l'erreur entre deux ensembles de données. En d'autres termes, elle compare une valeur prédite et une valeur observée ou connue. Plus la valeur de RMSE est petite, plus les valeurs prédites et observées sont proches. Elle est calculée par le biais de l'équation 3:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_i (V_i - \bar{V}_m)^2}{n}} \quad (3)$$

n Le nombre d'heures pour une journée,

- \bar{V}_m Désigne la valeur de la journée moyenne pour l'heure i
 V_i Représente la valeur de l'heure i pour la journée considérée.

2.3.2. Détermination de l'énergie non utilisée

Pour calculer l'énergie non utilisée au niveau de la centrale, il nous faut tout d'abord calculer le rendement électrique de l'installation et le ratio de performance de l'installation. Ces deux éléments nous permettent de déterminer l'énergie réellement produite et l'énergie solaire disponible sur le site.

Le rendement électrique se calcule en faisant le rapport entre la somme des puissances consommées par les charges et la puissance à la sortie de l'onduleur. Le ratio de performance désigne le rapport entre la production énergétique réelle et la production énergétique théoriquement disponible.

Pour pouvoir calculer le ratio de performance d'une installation photovoltaïque, il est nécessaire de disposer de différentes valeurs. D'une part, nous avons besoin des valeurs d'ensoleillement correspondant au lieu de l'installation photovoltaïque. Ces valeurs peuvent être obtenues à l'aide d'un appareil de mesure qui mesure la quantité d'énergie rayonnée sur l'installation photovoltaïque ou à l'aide de bases de données satellitaires. D'autre part, nous avons besoin des dimensions de la surface modulaire de l'installation photovoltaïque, et du rendement des panneaux photovoltaïques. Le ratio de performance se calcule en utilisant l'équation 4.

$$RP = \frac{\text{Production réelle (kWh)}}{\text{Production disponible (kWh)}} \quad (4)$$

L'énergie disponible correspond à l'énergie qu'aurait produite le système photovoltaïque à son maximum, c'est-à-dire si à tout moment la charge le permettait. Elle se calcule en utilisant des valeurs d'ensoleillement issues de la base des données d'ensoleillement satellitaire Helioclim -3 – HC3. L'énergie réellement produite par le système est l'énergie que produisent les panneaux solaires en fonction des charges connectées. Pour déterminer l'énergie réellement produite, on utilise l'équation 5.

$$\text{Energie solaire produite} = \text{PV to battery kWh} + \text{PV to consumers kWh} \quad (5)$$

« PV to battery kWh » est l'énergie venant des panneaux solaires et allant dans les batteries.

« PV to consumers kWh » est l'énergie venant des panneaux solaires et allant vers les consommateurs.

Dans un premier temps les énergies journalières sont calculées pour chaque jour en prenant la somme des énergies mesurées. La somme des énergies journalières ainsi obtenue donne l'énergie réellement produite sur la période d'étude.

$$E_t = \sum E_i \quad (6)$$

Avec E_i qui représente les énergies élémentaires et E_t l'énergie totale sur la période d'étude.

L'énergie solaire disponible se calcule en utilisant des données d'ensoleillement satellitaire accessibles à partir de la base de données Helioclim -3 – HC3 sur le site web SoDa (Solar Irradiation Data <http://www.soda-is.com>). Elle se calcule en utilisant l'équation 7.

$$\text{Energie solaire disponible} = \text{Ensoleillement} * S * \eta \quad (7)$$

Avec S la surface totale des modules photovoltaïque, η est le rendement des modules.

3. Résultats obtenus

3.1. Visualisation de la consommation des équipements

Les puissances consommées par les équipements peuvent être visualisée dans la partie « Advanced » de la plateforme de supervision de Victron.

La figure 3 présente l'évolution de la consommation sur la période d'étude qui est de 60 jours. On remarque dans cette figure que la puissance maximale est d'environ 4 700 W correspondant à la journée du 17/05 /2021. De même les puissances consommées diffèrent en fonction des jours ce qui peut être expliqué certainement par une charge de travail des équipements qui n'est pas régulière.

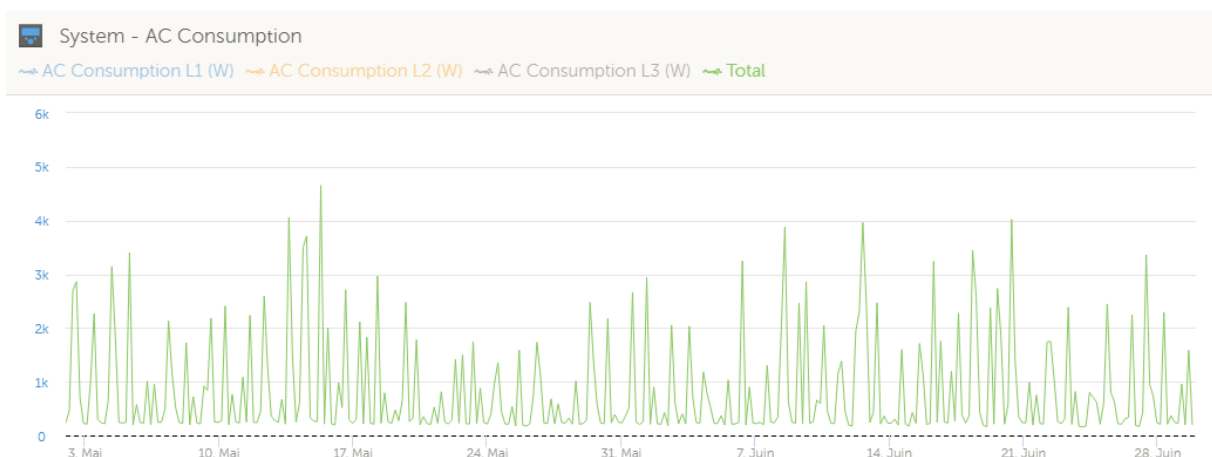


Figure 3 : Evolution de la puissance consommée sur la période d'étude

Pour la journée type, les simulations ont permis de constater que la journée du 24 Mai est la journée la plus proche de la moyenne elle représente de ce fait la journée type. Le profil d'utilisation de cette journée type est obtenu en explorant la partie « Advanced » de la plateforme Victron. La manière d'utilisation des équipements productifs par les villageois se base sur plusieurs considérations. Tout d'abord il faut tenir compte de l'activité du prestataire qui est aussi un agriculteur qui s'occupe de son champ entre 11h et 17h. Il y'a aussi la demande de mouture et de décorticage qui est très fréquente entre 7h-10h et 18h-20h. Le profil d'utilisation des équipements productifs de ce village pour la journée type est présenté par la figure 4. Dans cette figure, les puissances des équipements en fonctionnement sont représentées en fonction du temps. On peut identifier sur ce profil quatre zones de fonctionnement.

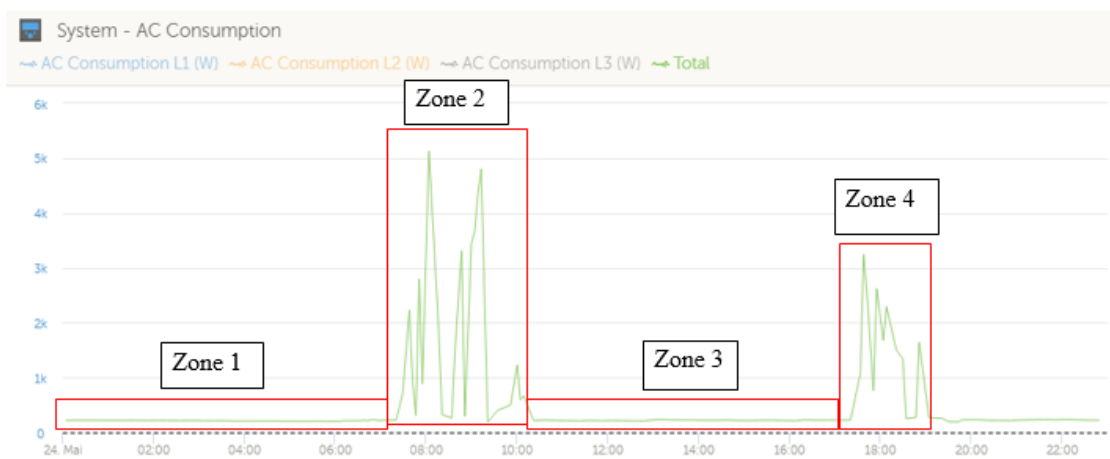


Figure 4 : Profil d'utilisation de la journée type

Zone 1 et Zone 3 : Dans ces deux zones, la consommation électrique du système est composée uniquement du congélateur et de la recharge des batteries de portable. La puissance consommée dans ces zones est d'environ 220 W. Ces zones couvrent la plus grande partie de fonctionnement sur le profil d'utilisation. Ces équipements dans ces zones fonctionnent presque de manière continue sur un jour mais ils ont une faible consommation. Ils tirent sur les batteries lorsque le système solaire n'est pas disponible.

Zone 2 : Dans cette zone de fonctionnement, tous les appareils (Moulin, décortiqueuse, congélateur et la charge de batterie) à part le Vibro tamiseur, fonctionnent avec des puissances maximales d'environ 5 200 W.

Zone 4 : La puissance caractéristique du moulin est proche de la puissance maximale notée dans cette zone. Les appareils en fonctionnement dans la zone 4 sont le moulin et les

équipements qui fonctionnaient dans la zone 1 et 3. On note une puissance maximale de 3 250 W. L'utilisation du moulin seul comme gros consommateur est justifié par la demande des utilisateurs.

Remarque :

Le profil d'utilisation de ce village nous montre que les équipements de fortes consommations ne fonctionnent à majorité que durant les périodes où la production d'énergie solaire est faible ce qui est mauvais signe quant à l'utilisation du système solaire. La plateforme est sous utilisée, une optimisation de l'usage pourrait s'appuyer sur une augmentation des charges et un déplacement de charge durant la période de 11h à 16h.

3.2. Energie non utilisée

En sachant quel est le potentiel maximal de production de l'installation, on peut estimer l'énergie non utilisée pour d'autres usages. L'énergie non utilisée est la différence entre l'énergie réellement produite par le système solaire et l'énergie solaire disponible.

Nous calculons d'abord le rendement électrique qui permet de mesurer l'efficacité de l'ensemble du système, hors conversion de l'énergie dans les modules. Le calcul du rendement électrique de l'installation est disponible au niveau du tableau 3.

Tableau 3 : Calcul du rendement électrique hors conversion des modules

	Sortie onduleur	Consommation charges (équipements + batterie)	Rendement
28/09/2021 09h33	3123	182 + 2777	0,94
29/09/2021 15h23	1292	199 + 978	0,91
04/10/2021 à 12h10	1280	170 + 1026	0,93

Le rendement électrique moyen de l'installation hors conversion de l'énergie dans les modules est environ égal à 92%. Il se calcule en faisant le rapport entre la somme des puissances consommées par les charges et la puissance à la sortie de l'onduleur.

Le ratio de performance est l'une des valeurs les plus importantes pour l'évaluation de l'efficacité d'une installation photovoltaïque. Son calcul sur la période de disponibilité des données nous donne une valeur de RP égale à 18%. Cette faible valeur de RP est un indicateur de la sous exploitation de la capacité de la centrale solaire.

La figure 5 donne l'évolution de l'énergie solaire produite et de l'énergie solaire disponible sur toute la période de disponibilité des données (02/05/2021 au 30/06/2021).

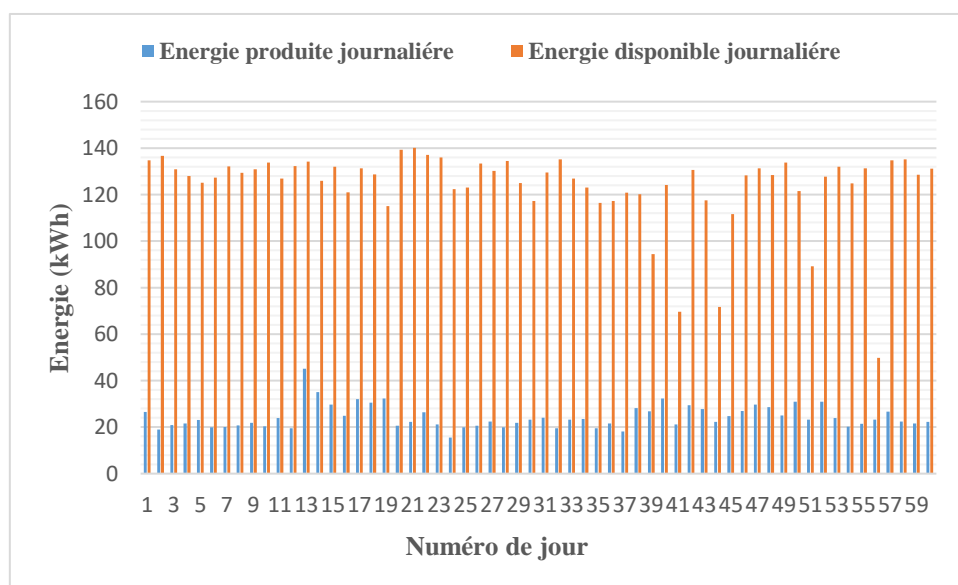


Figure 5 : Energie disponible et énergie produite sur la période d'étude

On remarque que l'énergie solaire potentiellement disponible est largement supérieure à l'énergie solaire réellement produite par le système. L'énergie totale produite sur la période est égale à 1 460 kWh alors que l'énergie disponible sur le site est égale à 7 964 kWh. La différence entre ces deux valeurs qui est de 6 504 kWh montre que le système solaire installé dans le village de Godaguene Sorokh est sous exploité. Cette tendance se confirme lorsqu'on regarde le taux d'utilisation de la centrale solaire sur toute la période d'étude qui est donné au niveau de la figure 6. On note des taux d'utilisation faibles avec une valeur maximale n'atteignant pas 50% et une valeur moyenne d'environ 20%.

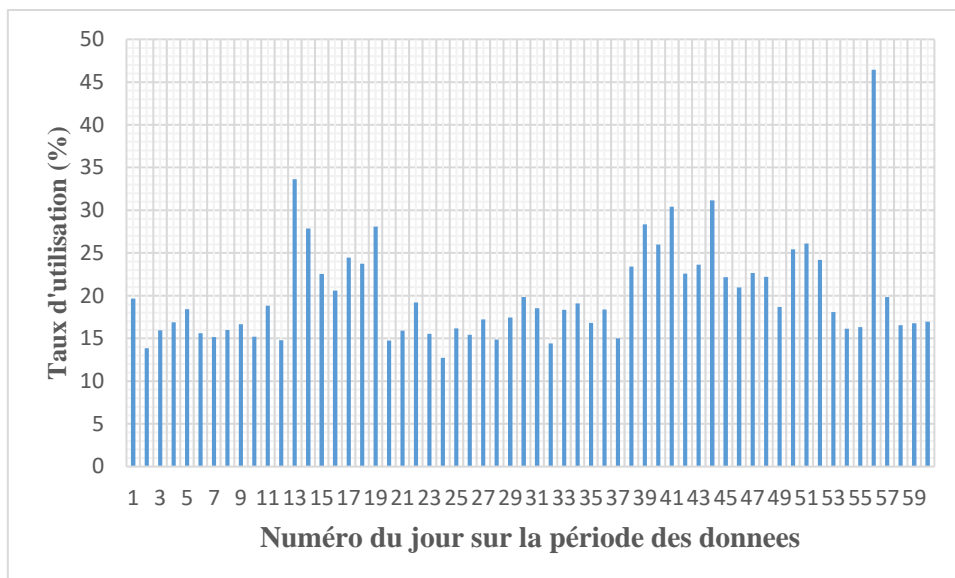


Figure 6 : Taux d'utilisation du système solaire

Pour la journée du 24 Mai considérée comme journée type, la comparaison de l'énergie produite et l'énergie disponible est donnée au niveau de la figure 7. La partie entre les deux courbes représente l'énergie non utilisée pour cette journée. Cette énergie non utilisée est estimée à environ 115 kWh. Pour cette journée, le taux d'utilisation du système est égal à 16% traduisant toujours une sous exploitation du système solaire.

La valorisation de cette importante quantité d'énergie s'avère nécessaire pour aboutir à une performance satisfaisante du système. Cela passe nécessairement par un ajout de nouveau équipement avec une stratégie bien défini afin d'optimiser les performances du système.

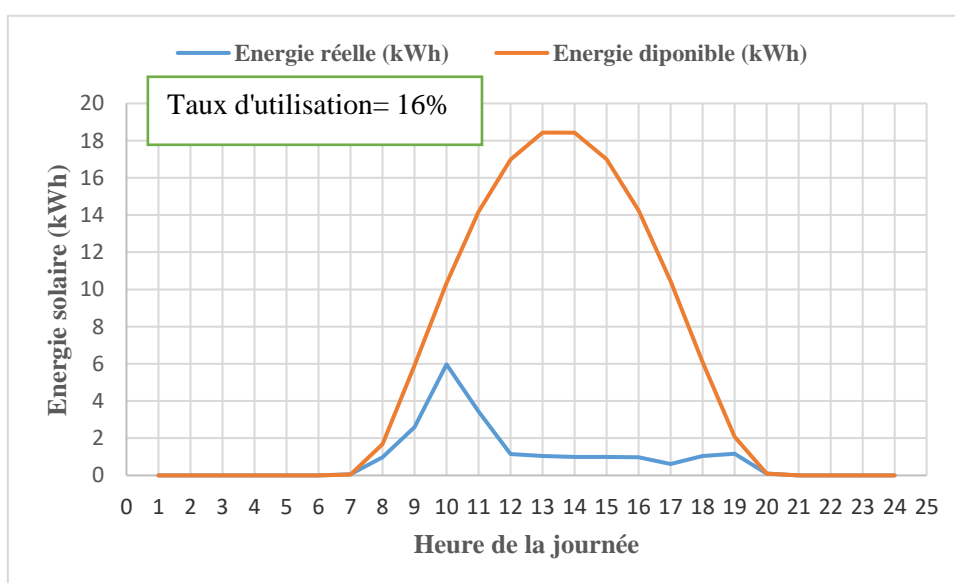


Figure 7 : Energies pour la journée type

4. Recommandation

Cette section de recommandation se base essentiellement sur la proposition de solution d'amélioration des performances de la plateforme du site de Godaguene Sorokh. Il s'agit ici d'identifier les problèmes liés à la performance énergétique de la plateforme multifonctionnelle de Godaguene.

D'après l'analyse du système, le principal problème noté est la sous exploitation du système.

Pour résoudre ce problème, nous devons répondre aux questions suivantes :

- Si on rajoute des charges fonctionnant la nuit, le système aura-t-il suffisamment d'énergie pour recharger les batteries et assurer le service attendu de jour ?
- Y-a-t-il des usages spécifiquement journaliers qui n'auraient aucun impact sur les batteries ?
- Si on change les heures d'utilisation, peut-on optimiser encore l'énergie produite ?

Pour répondre à ces questions il faut d'abord identifier les équipements susceptibles d'être ajoutés en se basant sur les besoins spécifiques des habitants.

Sur la base d'une mission effectuée à Godaguene Sorokh nous avons pu recueillir les besoins en équipement qui sont répertoriés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Besoins en équipement des habitants de Godaguene

Besoins	Utilité	Puissance	Temps de fonctionnement	Energie
Congélateur de grande puissance	Augmentation de la production de rafraichissant afin de satisfaire toute la demande	600 W	07h-19h	7 200 Wh
Electrification Public	Sécurisation du site	4 * 50 W	19h-7h	2 400 Wh
Unité de conservation de lait	De septembre à Février la production en lait est importante dans le village		24h	10 200 Wh
Menuisier Soudeur	Fabrication et réparation d'équipement métallique	1 500 W	3h	4 500 Wh

Station de pompage de l'eau	Exauce de l'eau pour l'irrigation et la consommation	3 000 W	(10h-17h) 7h	21 000 Wh
-----------------------------	--	---------	--------------	-----------

L'énergie journalière totale des équipements à ajouter est égale à 45,3 kWh. Cette valeur est inférieure à la valeur de l'énergie restante pour la journée type qui est de 115 kWh.

L'énergie totale que délivre le système de stockage à la charge sur toute la période d'étude est d'environ 421 kWh.

En moyenne l'énergie nécessaire pour charger les batteries pour une journée est d'environ 18 kWh.

Les charges nocturnes à ajouter sont l'éclairage public et l'unité de conservation de lait qui occasionne durant la nuit fonctionne une consommation d'environ 5 100 Wh/j. D'où une consommation nocturne ajoutée de 7,3 kWh/j.

La consommation totale des charges à ajouter fonctionnant durant la journée est égale à 37,8 kWh/j. Cette énergie si elle est additionnée à l'ancienne consommation énergétique pour la journée type nous donne une valeur inférieure à l'énergie disponible pour cette journée.

Comme dernière recommandation, il serait intéressant de faire fonctionner les équipements productifs à des heures de fort ensoleillement afin de tirer directement sur la production solaire.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, l'objectif principal est d'optimiser les performances énergétiques de la plateforme multifonctionnelle de Godaguene Sorokh. Il s'agit ici de caractériser les modes d'utilisation afin de voir le comportement des usagers et de proposer des solutions d'amélioration.

Dans un premier temps une prise en main de la plateforme de monitoring des données du site de Godaguene Sorokh était nécessaire. L'analyse des données issues de la plateforme de monitoring Victron Energy du site de Godaguene Sorokh nous a permis de déterminer le rendement électrique de l'installation qui est de 92%. Ensuite nous avons évalué le ratio de performance du système qui est de 18% traduisant une très faible exploitation du système.

Dans un deuxième temps l'énergie réellement produite par le système et l'énergie solaire disponible sont calculées sur toute la période d'étude et de manière spécifique sur la journée type. Cela nous a permis à la fin de déterminer l'énergie non utilisée au niveau du site. L'énergie produite sur la période de l'étude est égale à 1 460 kWh alors que l'énergie disponible sur le

site est de 7 964 kWh. On note ainsi une quantité d'énergie non utilisée de 6 504 kWh qui montre que le système solaire installé dans le village de Godaguene Sorokh est sous exploité. Cette partie de l'étude ouvre plusieurs perspectives à explorer pour la suite de ce travail. Parmi ces perspectives, des solutions d'amélioration des performances énergétiques de la plateforme. Ces propositions se baseront essentiellement sur l'intégration optimale des besoins spécifiques en équipement des populations afin de valoriser la quantité d'énergie non utilisée.